条植水稻群落における放射温度の方位角依存性

松 島 大

(東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻)

Azimuth Angle Distribution of Thermal-Infrared Temperature over Rice Canopy with Row Orientation

Dai MATSUSHIMA

(Geophysical Institute, Tohoku University, Sendai, 980-8578 Japan)

Abstract

Using ground-based and airborne observation, as well as numerical simulation, we confirmed that the thermal-infrared temperature (TIT) of a rice canopy surface with row orientation changes with azimuth viewing angle. The TIT of the direction parallel to row orientation is 1–4°C higher than that of the other directions. The TIT differences occur during the daytime, and for a leaf area index (*LAI*) around 0.5–3 because the field of view of an infrared thermometer viewing a direction parallel to the rows contains much more of the water surface under the rice canopy than the plant surface of the canopy. The temperature of the water surface between rows is much higher than that of the plant surface, because the intense incoming solar radiation near noon is not absorbed by the canopy and so warms the water efficiently. Matsushima and Kondo (1997) developed a radiation transfer model for TIT of a rice canopy surface, and confirmed a nadir viewing angle dependence of TIT of according to leaf area index. Based on the above model, a model of a rice canopy with row orientation was developed to investigate the TIT variation with azimuth viewing angle. The model design employs the ratio of the apparent areas of the plant surface and the underground water surface, which change with the azimuth and nadir viewing angles, and reproduces the observation well. These results indicate that the main cause of the TIT difference is the ratio of the apparent areas of the plant surface and the water surface when the temperature of the water surface is much higher than that of the plant surface. The TIT in a westerly direction exceeds that of the other directions shortly after sunrise because the solar elevation is low and the azimuth of the sun is around east. This is because the plant surface temperature exceeds that of the water surface, which is opposite the near noon cases. On the scale of a satellite grid, a simple numerical experiment demonstrated that the TIT difference of azimuth viewing angle increases as the row orientation in the subgrid scale becomes nearly uniform.

Key words: Rice canopy with row orientation, Thermal-infrared temperature, Radiation transfer model, Azimuth viewing angle.

キーワード: 条植水稻群落, 放射温度, 放射伝達モデル, 測定方位角

1. はじめに

熱赤外放射温度計を用いた農耕地や植生地における地表面や葉面・群落面温度の計測は、斜面温暖帯の推定 (Kobayashi *et al.*, 1994) や、熱収支式・バルク式などを併用した蒸発散量の推定など地表面フラックスの推定

(例えば, Huband and Monteith, 1986) に活用されるようになってきている。地表面のエネルギーフラックスや蒸発散量については人工衛星から得られる植生指標と熱赤外バンドによる地表面温度を地上気象データなどとともに用いて、広域陸面のエネルギーフラックスの推定が行われるようになった (例えば, Aono *et al.*, 1998)。しかし、植生地の放射温度計測については裸地などとは

2001年11月12日 受付, 2002年4月15日 受理

Fig. 1. Explanations of the nadir and azimuth angles.

異なる問題が顕在化するようになった。それは、植生地においては放射温度計の測定角によって放射温度が大きく変化する可能性があることである。このうち、測定天底角 (Nadir angle, Fig. 1 参照) による変化は Kimes *et al.* (1980) などによって見出され、放射温度計を真下に向けたときの温度と、真下から 80° 傾けたときの温度が大きい場合には 10°C 以上異なることが示された。特に真下に近い測定角における放射温度は顕熱フラックスの推定に用いる場合に大きな誤差をもたらすため、これまでの顕熱に対する粗度長の定義を修正する必要があると報告されている (例えば, Sugita and Brutsaert, 1990)。

Lagouarde *et al.* (1995) は測定天底角による温度変化とともに測定方位角による温度変化についても部分的測定を行っている。それによると、植生地では天底角による変化に比べて方位角による系統的な変化は見出されなかったものの、深い畝状の裸地面では日当たりの良い畝の側面が視野に入る測定角で他の場合より高温になることが見出されており、条植水田でも同様の温度差が生じることを示唆している。さらに、農耕地において、特に畝立てを行った畑の場合、畝の方向や太陽高度・方位角などによって放射収支や熱収支に大きな変化が見られることが定量的に明らかになってきている (Baten and Kon, 1997 など)。このような場合、測定方位角によって放射温度が系統的に異なってくるものが十分に予想される。

本研究では、水稻群落を対象として測定方位角によ

って群落上から計測した放射温度がどのように変化するかを、地上観測と航空機観測によって調べる。また、観測結果に基づいて水稻群落の簡単なモデル化を行い、条に平行な方向と直角な方向で放射温度が異なることを再現するシミュレーションを行う。さらに、衛星計測におけるグリッドスケールにおいて、このような個々の水田の測定方位角による温度変化がサブグリッドスケールの水田の条方向の分布を介してどの程度影響するかのシミュレーションを行う。

2. 観測方法

2.1 地上観測

地上観測は水稻の栽培期間に行った。観測の概要は以下のとおりである。まず、観測地は宮城県遠田郡小牛田町にある水田である (北緯 $38^\circ 33'$, 東経 $141^\circ 02'$)。測定の対象になった水稻はほぼ南南西-北北東方向に条植されていた。その畝間と株間はそれぞれ $30\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ である。観測は 1993, 1994 年の 5 月から 9 月までと、1997 年 6 月から 7 月までに行われ、その間に水稻群落の葉面積指数は 0.01 から最大 5 程度まで変化した。放射温度測定は地表面から 4.5 m (1993 年), 6.5 m (1994 年), または 5 m (1997 年) のタワー上で行った。用いた放射温度計は松下通信工業社製の ER-2007 と Heilmann 社製 KT-19.85 (1997 年のみ ER-2007 と併用) で測定視野角はいずれも 2° 、測定波長域は前者が $8.5 \sim 12.5\text{ }\mu\text{m}$ 、後者が $9.6 \sim 11.5\text{ }\mu\text{m}$ である。測定天底角は $0^\circ, 30^\circ, 55^\circ, 70^\circ$ (1993 年), $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ (1994 年), または $0^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ (1997 年) である。また測定方位は水稻群落の条に平行な方向 (南南西) と垂直な方向 (西北西, 東南東) で、条に平行な北北東についてはタワーで視野が遮られるために欠測とした。ただし、1997 年については水稻群落の条の走向を基準にした 8 方位について行い、やはり視野が遮られる測定角については欠測とした。一連の測定は約 5~10 分程度で行われたので地表面温度の時間変化による誤差はほぼ無視できる。以上の観測のうち 1993, 1994 年についての詳細は Matsushima and Kondo (1997) に述べられている。

2.2 航空機観測

航空機観測も水田上空において水稻の栽培期間中に行った。観測の概要は以下のとおりである。まず、観測地は宮城県名取市にある仙台空港周辺の水田である (北緯 $38^\circ 07' - 08'$, 東経 $140^\circ 53' - 54'$)。測定の対象になった水稻はほぼ南南西-北北東方向に条植されていた。観測は 1999 年から 2001 年の間に行われた。具体的な日付は Table 1 に示した。用いた放射温度計は Inframet-

Table 1. The dates, times, and measuring altitudes of airborne observations and corresponding *LAI* (estimated) of rice paddy.

Flight No.	Date	Time (JST)	<i>LAI</i>	Altitude AGL (Nadir Angle)
1	May 14 1999	1213-1225	0.1	500 m
2	June 29 1999	1315-1337	2	850 m 1,000 m (0°), 750 m (50°), 500 m (70°)
3	July 10 2000	1242-1302	3	1,500 m (0°), 750 m (50°), 500 m (70°)
4	July 2 2001	0806-0825	3	1,500 m (0°), 750 m (50°), 500 m (70°)
5	July 2 2001	1302-1317	3	1,500 m (0°), 750 m (50°), 500 m (70°)

rics 社製の赤外線カメラ Model 740 で 2 次元の赤外画像が得られる。測定視野角は縦 $15^\circ \times$ 横 20° 、画素数は縦 $198 \times$ 横 256 、測定波長域は $8 \sim 14 \mu\text{m}$ である。測定天底角は 0° , 50° , 70° で測定方位は条に平行な方向（南南西, 北北東）と条に垂直な方向（西北西, 東南東）の 4 方位である。本文中では今後、方位の呼称について簡単のために南南西を南, 北北東を北, 東南東を東, 西北西を西とする。対象とする水田は異なるものの、地上観測と航空機観測を通じて条の方向は南北方向である。航空機には小型のヘリコプタ (AS350B) を用いた。赤外線カメラの架台は機内のレバーによって測定天底角を 0° から 70° までのうち任意の角度に設定できる。測定高度は Table 1 に示した。測定天底角によって測定高度を変えているのは赤外画像の画素の大きさをほぼ同じにするためである。飛行は 6 回行ってこのうち 5 回について有効なデータが得られた。1 回の飛行について一連の赤外画像の撮影は約 20 分以内に行われており地表面温度の時間変化による誤差は小さいと考えられる。また一連の撮影の最初と最後には同一地点・測定角の撮影を行って、放射温度の時間変化量を各画像に対して調整している。

3. 結 果

3.1 地上観測の結果

地上観測の結果を特別、葉面積指数 *LAI* 別に整理したものを図示する。Fig. 2 は天底角 70° で測定された放射温度の時系列を示したものである。放射温度は天底角 0° （真下）で測定された放射温度との差で表されている。Fig. 2 では群落高のほぼ $3/4$ の高さにおける群落内部の温度（葉群温度） T_c と群落下の水面温度 T_g （いずれも放射温度測定値）の差 $T_c - T_g$ の時系列も同時に示している。測定方位は条に平行な南向きと条に垂直な西・東向きである。また、全天日射量の日変化と条方向に対する太陽の方位角も同時に示している。Fig. 2 a の *LAI* = 0.68 の場合は、明け方に東向きと西向きの温度が南向きに比べて高くなっているのと、日中に東・西向きの温度が南向きに比べて低くなっているという主に 2 つの特徴を見出せる。また、東・西向きの温度変化は南

Fig. 2. Time series of thermal-infrared temperature of rice paddy for three directions observed at 70° from nadir in cases of *LAI* = 0.68 (a) and *LAI* = 5.4 (b). Also illustrated are the difference between the thermal-infrared temperature of the canopy interior at $3/4$ of the canopy height (T_c) and of the underground water surface (T_g), and difference between the solar azimuth and row orientation.

向きに比べて $T_c - T_g$ の変化と良い相関を示している。これは、東・西向きの放射温度が葉群温度 T_c の影響を強く受けていることを示している。一方、Fig. 2 b の *LAI* = 5.4 の場合では明け方では温度が高いが、Fig. 2 a の場合とは少し違って温度の高い順に西向き・南向き・東向きである。また、日中の 3 方向の温度はほとんど一致している。これは、Fig. 2 a の場合に比べて *LAI* が大きいために、方位角によらず T_c の影響を受けやす

Fig. 3. A comparison of calculated thermal-infrared temperature between two cases: the emissivity ε decreases with nadir viewing angle (Control), and ε is assumed constant 0.98. "Parallel" ("Perpendicular") denotes a direction parallel (perpendicular) to rows. Indications of T_g and T_c are the same as Fig. 2, but are calculated values.

いことを示している。Fig. 2 に示した 2 つの場合ともに日中の天気は快晴に近く日射量はほぼサインカーブで示されるような日変化を示した。明け方に特に西向きに測定で放射温度が高くなるのは、太陽高度が低く太陽方位角が東に近いために水稻群落上部が群落下部や群落下の水面に比べて多くの日射量を受け取り、さらに天底角 70° の測定ではその群落上部が主に測定視野に入るためと考えられる。西向きの放射温度が $T_c - T_g$ の変化により近いことも上記のことを示唆している。一方、東向きの測定では同じ水稻群落上部でも西向き測定の場合とは逆にその陰の部分を見るために温度が低く測定され则认为られる。 $LAI=0.68$ の場合に日中を除いて南向きの温度が西・東向きより低くなっているのは上記の説明のほかに水面の射出率の寄与が大きいためである。平らな水面の射出率は天底角 0° に近い測定ではほぼ 0.98 程度の値になるが、天底角が大きくなると小さくなっていく性質があり、これは電磁光学による計算によって確かめられている (Matsushima and Kondo, 1997)。計算結果によると天底角 70° では水面の射出率は 0.90 になる。 LAI がおよそ 2 より小さい場合は放射温度計の視野に占める水面の割合が高く、このような場合に天空が快晴に近いときほど放射温度は低く測定されることになる。これは放射伝達モデルによるシミュレーションでも確かめることができ、その結果は Fig. 3 に示される。射出率が天底角によって変化しないと仮定した場合では通常の変化する場合に比べ、葉群温度より高温である水面

Fig. 4. Thermal-infrared temperature of rice paddy for eight azimuth directions and two nadir angles by ground-based observation for six cases. RUN 1: June 11 1997, 12hJST, $LAI=0.3$., RUN 2: June 25 1997, 8hJST, $LAI=0.7$., RUN 3: June 25 1997, 13hJST, $LAI=0.7$., RUN 4: July 1 1997, 7hJST, $LAI=1.7$., RUN 5: July 1 1997, 11hJST, $LAI=1.7$., RUN 6: July 1 1997, 16hJST, $LAI=1.7$. The angles on the top of the figure denote nadir viewing angles.

温度の影響が大きく表れている。特に、条に平行な方向における射出率の影響が著しいが、これは条に垂直な方向に比べて放射温度計の視野に占める水面の割合が高いためである。なお、この計算に用いた放射伝達モデルについては 4.1 において述べる。

Fig. 4 は条の走向を基準にした 8 方位について 1997 年に測定された水稻群落の放射温度を比較したものである。測定を行った場所が観測小屋の上であったために、小屋の陰になるなどして必ずしも全方位で測定することはできなかったが、測定結果から日変化や LAI による変化をある程度推定することができる。まず、7 月 1 日の例では $LAI=1.7$ であるが、測定天底角 70° の場合に太陽方位角や日射量の日変化による違いが読み取れる。7 月 1 日 7 時 (RUN4) には南西から西向きにかけて最も放射温度が高くなっている。これは Fig. 2 の例について述べた明け方に西向きの放射温度が太陽方位角の影響で高くなることと対応しており、 LAI の小さい RUN 2 にもこの傾向が見られる。11 時 (RUN5) になると条方向 (南・北) の放射温度が最も高く、条に垂直な方向 (西・東) の放射温度は条方向より低くなっている。条に対して斜めの方向 (南西・北西・北東・南東) ではさらに放射温度が低くなっている、図におけるグラフの形は W のようになっている。これは条方向、条に垂直な方向、条に斜めの方向の順に放射温度計の視野に占める見かけの葉面積が増加していることに対応しているが、こ

れについては 4.1 において再度説明する。ただし、「見かけの葉面積」とは、放射温度計の視野中における、測定角と垂直な視野の断面に射影された葉面の面積のことであり、「見かけの水面の面積」なども同様のことを意味する。16 時 (RUN6) になると条方向の放射温度がほかより若干高いものの大きな差はなくなっている。日中でも昼近くのほうが夕方より方位ごとの差が大きくなっているのは昼近くのほうが大きな日射量によって水稻群落の葉面温度と群落下の水面温度の差が大きいためである。測定天底角が 50° の放射温度には、データが不足していることもあるが、明確な方位による違いは見出せない。これは天底角 50° の場合には 70° の場合に比べて条方向と条に垂直な方向とで見かけの葉面積が大きく変わらないためと考えられる。再び測定天底角 70° の場合に戻り、 LAI の変化によって方位ごとの放射温度の違いがどのように表れるかを調べる。いずれも正午近くに測定された RUN1, RUN3, RUN5 の 3 つについて考える。それぞれの LAI は 0.3, 0.7, 1.7 である。ただし、 LAI は RUN1 については Matsushima and Kondo (1997) や Kondo and Watanabe (1992) に基づく推定値で、そのほかは実測による。RUN3 では RUN5 のような W 型の分布に近いが条に垂直な方向の方がむしろ放射温度が高くなっている。また、 LAI の小さい RUN1 については条方向にはあまり依存しない分布になっている。このように、 LAI が特に 1 より小さい範囲では LAI が小さいほど方位による放射温度の差は条方向について系統的ではなくなっている。この原因は放射温度計の視野に占める見かけの葉面積の方位による違いが LAI が小さいほど小さくなることとともに、今回の観測では測定角によって測定視野に入る水稻群落の場所が多少異なっているために水田の水深などによる温度差が測定結果に表れているとも考えられる。

以上に述べたように、 LAI が 1~2 程度では条方向に対する放射温度計の測定方位角により放射温度に系統的な差が表れることが確かめられた。ところで、Matsushima and Kondo (1997) は放射温度を地表面温度としてバルク法に用いた場合、水田の顕熱フラックスの推定には測定天底角が 70° 程度のときに最適であることを示した。これは、群落内で顕熱交換が最も盛んな部分が群落上部であり、測定天底角が大きいときに群落上部の表面温度を測定しやすいためである。特に地上ベースでの観測ではこのような水平に近い角度で測定する場合もあると考えられるので、 LAI に応じた測定方位角の影響を考える必要がある。

3.2 航空機観測の結果

前節で述べたように地上観測の結果から LAI が 1~2

Fig. 5. An example of thermal-infrared image acquired by airborne observation (70° from nadir at 1259 h JST, July 10, 2000). The gray-scale (256 levels) of each pixel is whiter as temperature increases, which is illustrated in the bottom of the image. The temperature ranges between 20 and 40°C .

程度の場合、条方向に対する方位角別の放射温度に系統的な差が表れることが確かめられた。しかし、地上観測では測定視野に入る対象が一樣でないことによる誤差の影響が免れず、また前節での結果を衛星計測に応用しようとする場合、地上観測では数百 m 以上の大きなスケールをカバーすることが難しい。そこで、航空機観測によってそのような大きなスケールでも地上観測で見出されたのと同様の系統的な差が表れるかどうかを調べた。各飛行の飛行時刻、飛行高度、そのときの水稻群落の LAI などは Table 1 に示した。Fig. 5 は撮影された赤外画像の一例である。画像の中央を横切る高温部分は高速道路の仙台東部道路でその周りに水田（温度の低い部分、黒っぽい部分）や収穫間近の小麦畑（温度のやや高い部分、やや白っぽい部分）が広がっている。画像に収まっている地表面の水平スケールは飛行高度や測定天底角によって異なるが数百 m から 1 km 程度である。本研究では水田部分を対象に解析を行った。

Fig. 6 は各飛行ごとに測定された放射温度の平均値と標準偏差を示したものである。ただし、ひとつのサンプルは区画整備された水田の 3 分の 1 枚から 1 枚程度に相当する面積（数百から $1,000\text{ m}^2$ ）の水田の平均放射温度である。この放射温度は LOWTRAN7 (Kneizys et al., 1988) により大気補正が施されている。大気補正の計算には同時にヘリコプタに搭載された Vaisala 温湿度計 (HMP133) で測定された気温・湿度の鉛直分布を用いた。ヘリコプタの飛行高度より上空については仙台管区気象台での高層気象観測データを時間内挿したもの

で補った。Fig. 6 によると測定天底角が大きくなるにつ

Fig. 6. Thermal-infrared temperature of rice paddy for four directions acquired by airborne observations. Error bars mean standard deviations. Symbols and captions are the same as in Fig. 4.

れて放射温度が低くなる大きな変化とともに、測定方位による2次的な変化を見出すことができる。Flight 2, 3, 5については条方向(南・北)と条と垂直な方向(東・西)との温度差が見られ、この差は測定天底角が 50° の場合のほうが 70° の場合よりも大きい。この条方向と条に垂直な方向の温度差はほとんどの場合に危険率5%未満で有意である。天底角が 50° の場合のほうが 70° の場合より差が表れやすいのは、放射の透過率が $\exp(-LAI \cdot \sec \phi)$ (ϕ は測定天底角)に比例し、かつ条に垂直な方向の見かけの LAI が条方向のに比べて $\sqrt{2}$ 倍であることを考えると、測定時の LAI が3程度なので、天底角 70° では両方向の違いが透過率には表れにくかったと解釈できる。一方、Flight 4では西向きに測定された放射温度がほかの向きのものに比べて高い。これについても西向きとそのほかの方位との温度差は危険率1%未満で有意である。以上の結果から、衛星計測による地表面のグリッドスケールに近い数百mから1km程度の水平スケールについても地表面の放射温度が測定方位によって系統的に異なることが示された。

4. モデル化

4.1 見かけの葉面と水面の比のモデル化

前章までに条植水稻群落面の放射温度が測定方位によって系統的に異なることを観測によって確かめることができた。ここでは、観測データに基づいて条植水稻群落のモデル化を行い、放射温度が測定方位(条方向と条に垂直な方向)によって異なることを数値計算により再現することを試みる。

Fig. 7は条植水稻群落のモデル化を説明するための図である。まず、Fig. 7aのように水稻の植え付け間隔

Fig. 7. (a) Unit canopy model with rice paddy area ($x \times y$). (b) Illustration of why apparent areas of plant surface are proportional to $\sec \phi$ (ϕ : nadir viewing angle). Width (B) is $\sec \phi$ times as wide as width (A).

(畝間 x , 株間 y)で区切られた区画の左下隅に稲株があるような長方形の空間を考え、これを単位群落(unit canopy)と呼ぶことにする。また、単位群落にある稲株が占める部分を一辺 a の正方形とする。 a は稲の成長にしたがって変化するパラメータである。この単位群落を真上から見下ろすと図の斜線部分に稲株、すなわち葉群があり、残りの部分は単なる水面があるように見える。ここで、Fig. 7aのように葉面(1)と水面の部分(2)~(4)のように区切ると、水面(2), (3)はそれぞれ測定方位が条方向、条に垂直な方向であるときに、天底角 ϕ に応じて群落上からの見かけでは葉面に覆われる一方、水面(4)はどちらの場合も葉面に覆われることがない。このことを考慮して測定天底角 ϕ における各部分の見かけの面積を計算するとTable 2のようになる。ここで、葉面(1)の面積が $\sec \phi$ に比例する理由を考える。稲の葉面の傾斜角分布はHorie (1981)の測定では鉛直方向に立っている葉の割合が若干多いものの、このデータをRoss (1975)の放射に対する葉面の傾きを示す関数 F に適用

Table 2. Apparent area of every segment of Fig. 7a at nadir viewing angle ϕ .

Section No.	Parallel to Row	Perpendicular to Row
(1)	$a^2 \sec \phi$	$a^2 \sec \phi$
(2)	$a(y-a) - a^2(\sec \phi - 1)$	$a(y-a)$
(3)	$a(x-a)$	$a(x-a) - a^2(\sec \phi - 1)$
(4)	$(x-a)(y-a)$	$(x-a)(y-a)$

すると、直達日射に対して天頂角 0° では $F=0.4$ 、天頂角 80° では $F=0.55$ となり (Matsushima and Kondo, 1997)、等方的な場合の $F=0.5$ に近い。つまり、どの角度から稲株を見てもほぼ一様に見えることと近似することができる。この場合、稲株を見ることはあたかも球を見ることに類推することができる。ここで、Fig. 7b を参考にすると、球に天底角 ϕ で平行光線を当てたときに、その射影の面積は $\sec \phi$ に比例することが分かる。こうして葉面 (1) の面積は $\sec \phi$ に比例すると近似でき、水面 (2), (3) の面積は葉面 (1) の射影が水面にかかった部分をもとの面積から差し引けばよいことが分かる。ただし、各区分で面積の計算値が負の数になったときは見かけの面積を 0 とみなす。こうして、条方向と条に垂直な方向それぞれについて測定天底角 ϕ におけるそれぞれ見かけの葉面と水面の面積比を計算できる。次に、葉面の部分と水面の部分の放射伝達をそれぞれ独立に計算する。この計算には Matsushima and Kondo (1997) が開発した放射伝達モデルを用いる。このモデルは測定天底角 ϕ 、葉面積密度と葉面温度の鉛直分布を与えると天底角 ϕ での放射温度を出力するものである。ここで、本研究では葉面積密度の鉛直分布の関数形として Matsushima and Kondo (1997) のものを用いる。この関数形は水稻群落については良い近似になっている。葉面積密度の値については同時に測定された LAI の値によって、この関数形を相似拡大するように与える。ただし、放射伝達の計算を葉面の部分と水面の部分について独立に行うために、前者の LAI を測定値の (xy/a^2) 倍に、後者の LAI は 0 とする。また、群落内の葉面温度の鉛直分布については、Kondo and Watanabe (1992) の多層モデルによって計算された値を用いる。この値は放射温度と同時刻に観測された群落上の気温・風速の鉛直分布を最もよく近似するように計算された値である。最後に、独立に計算された 2 つの放射温度を面積比で加重平均し、最終的な放射温度が得られる。なお、葉面積密度と群落内の葉面温度の鉛直分布については Fig. 8 に 1300 h JST の条件での一例が示されている。以下の計算において、Fig. 7 に示した ϕ 以外のパラメータの設定は、 $x=30$ cm, $y=15$ cm, 条植を考慮したモデルにおける

Fig. 8. Example of the vertical profiles of leaf area density α and plant surface temperature T_c at 1300 h JST, June 16, 1994. Air temperature T , wind speed u , and water surface temperature T_g are also illustrated. Indicated thermal-infrared temperatures are $T_{R,0}$, $T_{R,70S}$ and $T_{R,70W}$, which denote nadir viewing angles are 0° , 70° (southward) and 70° (westward), respectively.

a の値が、 $LAI=0.68$ の場合に 10 cm, $LAI=1.7$ の場合に 20 cm, $LAI=3.8$ の場合に 24 cm とした。 a が株間 y より大きい場合、区分 (1) の面積で株間を越える部分については無視した。

Fig. 9 にモデル計算値と観測値との比較を示した。ここで、モデル計算値は条方向、条に垂直な方向、および群落が一様な場合 (一様モデル) について示した。一様モデルとは放射温度計算の際に上述のように葉面と水面の部分に分けず、水平方向に葉面積密度が一様なキャノピーモデルとした場合のことである。また、いずれのモデル計算でも、水面および葉面の温度は同じ条件について等しい。つまり、放射温度を計算するための放射過程が異なっているだけである。各図には群落下の水面温度 T_g と群落高の 3/4 の高さにおける葉群温度 T_c (いずれも計算値) も併せて示した。Fig. 9a は Fig. 8 と同じ条件 ($LAI=0.68$ で日中の場合) であるが、特に天底角が 50° より大きい部分において、条方向とそれに垂直な方向の放射温度差がよく再現されている。また、同図の T_g , T_c や Fig. 8 を考慮すると、天底角が小さい場合の高温部分は群落下の水面温度に、天底角が大きい場合の低温部分は葉面温度に影響されていることが示唆される。Fig. 9b は $LAI=1.7$ で朝方の場合であるが、天底角が大きく測定方位が西向きであるほどほかの時間帯とは異なって放射温度が高くなることが定性的にはあるが再現されている。Fig. 9c は $LAI=3.8$ で日中の場合であるが、 LAI が大きいために $LAI=0.68$ の場合に比

Fig. 9. Comparisons of calculated and observed thermal-infrared temperatures for the cases of $LAI=0.68$, June 16, 1994, 1300h JST (a), $LAI=1.7$, July 1, 1997, 0700h JST (b), and $LAI=3.8$, July 14, 1994, 1300h JST (c). Indications of T_g and T_c are the same as Fig. 3. Captions are the same as in Fig. 3, but the azimuth viewing direction of observation is denoted in brackets.

べて天底角や方位による放射温度の差はともに小さくなっている。しかし、なお方位による差はよく再現されている。一方、Table 3 は $LAI=0.68$, 3.8 について全体に対する見かけの葉面積比を 100 分比で条方向と条に垂直な方向について示したものである。これを Fig. 9 a, c の結果と対応させると、それぞれ天底角 50° , 30° よ

Table 3. Percentages of apparent area of plant surface.

Nadir Angle ($^\circ$)	$LAI=0.68$		$LAI=3.8$	
	Parallel	Perpendicular	Parallel	Perpendicular
0	22	22	80	80
30	26	26	80	92
50	33	36	80	100
70	33	65	80	100

り大きい測定角では条方向とそれに垂直な方向の見かけの葉面積比が大きくなるのに対応して両方向の温度差が生じていることが分かる。また、いずれの場合も T_g が T_c より高いことから、見かけの葉面積の増加が温度差の主因になっていると結論づけることができる。

ここで、特に Fig. 9 a, c について天底角 0° のときに条方向と条に垂直な方向の放射温度が一致しているのに対して一様モデルの放射温度はそれらと一致していない。これは、放射温度の計算を 2 つに分けた場合のうち葉面に対する計算値と一様モデルの計算値があまり異ならないのに対し、水面の部分の計算では $LAI=0$ に設定しているために水面からの放射の減衰がなく、水温に対応する放射量がそのまま群落上に出てくるためである。

以上のように、本研究では条方向と条に垂直な方向の 2 方位に限ったものの、条植水稻群落の放射温度が方位によって異なることを、それぞれ見かけの葉面と水面の面積比を簡単にモデル化し、これに放射伝達モデルを適用することによりほぼ再現することができた。

4.2 水田の条方向の分布に対する考察

実際に存在する水田の条の方向は特に圃場整備の行われた水田では数 km スケールでほぼ一方向になっていることがある一方、さまざまな条の方向の水田が数百 m スケールのうちに混じっている場合もある。衛星計測では熱赤外バンドについてそのグリッドスケールは数百 m から数 km 程度であるが、この節では衛星計測によって水稻群落の表面温度を測定しようとする場合に条方向と測定方位の角度差によって放射温度にどの程度の影響が表れるかを簡単なモデル実験により調べた。Fig. 10 は日中のデータ（主に Fig. 4 における 1997 年 7 月 1 日 12 時のデータ）に基づいて測定天底角ごとに放射温度が方位角によってどのように変化するかをモデル化したものである。ただし、条の走向を方位角 0° – 180° としており、温度偏差の基準 (0°) は方位角 90° の温度とした。Fig. 11 は各グリッドにおける水田の条の走向分布をヒストグラムにしたものである。ただし、この図における方位角は北を 0° として時計回りである。ヒストグラム横軸右側の 'E' は水田以外の土地被覆を示す。条の

Fig. 10. Model of azimuth distribution of daytime thermal-infrared temperature anomaly for rice paddy with rows, when viewing angle is 30° (a), 50° (b), and 70° (c) from nadir. The azimuth angle in this figure is measured clockwise from the northward row orientation. The temperature anomaly is counted from the temperature at the 90° azimuth angle.

走向は現地調査と菅原（私信）による飛行するヘリコプタからのビデオ映像を参照した。この図によると特にグリッド番号 9, 10, 11 ではほとんど同一走向の条植水田で占められている一方、グリッド番号 13, 17, 19~23 ではいろいろな条の走向の水田が混在している。Fig. 12 は測定方位角が北を 0° とした時計回りで 30, 90, 210, 270° の場合にすべての水稻群落で Fig. 10 のような放射温度方位角分布のモデルが成り立つとして、Fig. 11 に示した各グリッドの条の走向分布に基づいて、各グリッドの放射温度を試算したものである。条の走向がほぼ同一であるグリッド番号 9, 10, 11 では測定方位角が条の走向とほぼ一致したときに高い温度偏差となって表れているのに対し、条の走向に直角な方位角では比較的小さい偏差になっている。一方、種々の走向を持つ水田が混在しているグリッド番号 13, 17, 19~23 では測

Fig. 11. Azimuth angle distribution of row orientation for every grid.

定方位角による差は小さくなっている。天底角 30° の測定では以上の特徴は全く見られない。これは Fig. 10 の温度分布モデルに条による大きな差が方位角についてなかったためである。また、天底角 50° よりも 70° の場合のほうが差が顕著になっている。これも Fig. 10 の温度分布モデルの違いが表れたものである。

以上のように、衛星計測のグリッドスケール程度でも、水田の条の走向と測定方位角が近い場合に条の走向に大きく影響された放射温度が測定される可能性が残ると考えられる。放射温度について 2°C 程度の誤差であっても、これをバルク法で顕熱フラックス推定に用いる場合に植生地では 30~50 Wm⁻² 程度の誤差になりうる。これは観測誤差に匹敵する大きさである。実際の衛星計測における測定天底角はおおむね 50 度以下の場合が多く、本節の結果を必ずしも適用しなくてもよい場合が多いと考えられる。しかし、NOAA (National Oceanic Atmospheric Agency)-AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) やヨーロッパの衛星 ERS-1 や ERS-2 に搭載された ATSR (Along Track

Fig. 12. Calculated values of thermal-infrared temperature anomaly of every grid for viewing angles of 30° (a), 50° (b), and 70° (c) from nadir.

Scanning Radiometer) センサーのように天底角が最大 55°で、地球の曲率を考慮した地上における衛星天頂角が 60°以上になる場合もある衛星データを用いる場合は注意が必要だと考えられる。

5. ま と め

本研究では、条植水稻群落について放射温度測定値に条の走向に影響された方位角依存性が存在するかどうかを観測とモデル計算によって確かめた。本研究で得られた結果をまとめると以下になる。

1. 地上観測と航空機観測の結果より 10 m~1 km 程度の水平スケールについて放射温度が方位によって系統的に異なることが確かめられた。
2. 上記の系統的な差が生じるのは日中、特に日射量の多い昼近くで、*LAI* は 0.5~3 程度であり、その大きさは 1~4°C 程度である。
3. 朝方は太陽高度が低く、方位角が東であるために西向きに測定された放射温度がほかの方位に比べて高くなっている。

4. 測定方位角によって放射温度が異なる原因は、条に垂直な方向の放射温度が条に平行な方向の放射温度に比べ、葉群温度に強く影響されるためである。

5. 測定天底角と条に対する測定方位を考慮してモデル化したそれぞれ見かけの葉面と水面の面積比を放射伝達モデルに適用することにより、上記の観測結果はよく再現された。

6. 衛星計測のグリッドスケール程度の水平スケールでも、水田の条が同一走向に近い場合はその走向が測定方位角に近いときほかの測定方位角に比べて大きな差を生じる可能性があることが簡単なモデル計算で示された。

以上の結果は水田のみならず、条や畝のある農耕地や林地で群落面の放射温度を測定する際に測定方位角に注意する必要があることを示している。また、放射温度をバルク法などと組み合わせて群落面からの顕熱・潜熱フラックスなどを推定しようとする際にも、たとえば水平スケールが 1 km 程度と大きい場合であっても測定方位角によってはフラックスの観測誤差に匹敵する誤差が生じる場合があることを示唆している。

謝 辞

地上観測においては水田の所有者である木村史芳氏から多くの支援を受けた。航空機観測においては東邦航空株式会社東北支社にヘリコプタへの赤外線カメラの取付や観測飛行などについて多くの助力を得た。本研究で用いた高層気象観測データは気象庁からご提供いただいた。防衛大学の菅原広史博士からは本研究の解析対象水田上空からのビデオ映像を使用させていただいた。鳥取大学の木村玲二博士および菅原博士には本論文の原稿を読んでいただき、多くの貴重なコメントを頂いた。また、東北大学気象学講座の学生諸氏には観測を手伝っていただいた。以上の方々に対しここに記して深甚の謝意を表する。

References

- Aono, Y., Kudo, T. and Monji, N., 1998: Seasonal change of heat budget in Ikoma Mountain forest estimated from satellite-derived data. *J. Agric. Meteorol.*, **54**, 143-154.
- Baten, M. A. and Kon, H., 1997: Comparisons of solar radiation interception albedo and net radiation as influenced by row orientations of crops. *J. Agric. Meteorol.*, **53**, 29-39.
- Horie, T., 1981: System ecological studies on crop-weather relationships in photosynthesis, transpira-

- tion and growth. *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci. Ser. A, physics and statistics*, **28**, 1-181 (in Japanese with English abstract and summary).
- Huband, N. D. S. and Monteith, J. L., 1986: Radiative surface temperature and energy balance of a wheat canopy. II Estimating fluxes of sensible and latent heat. *Bound.-Layer Meteorol.*, **36**, 107-116.
- Kimes, D. S., Idso, S. B., Pinter, P. J., Reginato, R. J. and Jackson, R. D., 1980: View angle effects in the radiometric measurement of plant canopy temperatures. *Remote Sens. Environ.*, **10**, 273-284.
- Kneizys, F. X., Shettle, E. P., Abreu, L. W., Chetwynd, J. H., Anderson, G. P., Gallery, W. O., Selby, J. E. A. and Clough, S. A., 1988: *Users Guide to LOWTRAN7*. AFGL-TR-88-0177, Air Force Geophysical Laboratory.
- Kobayashi, T., Mori, M., Wakimizu, K. and Take-shita, K., 1994: An observational study of a thermal belt on hillsides. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **72**, 387-399.
- Kondo, J. and Watanabe, T., 1992: Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2183-2199.
- Lagouarde, J. P., Kerr, Y. H. and Brunet, Y., 1995: An experimental study of angular effects on surface temperature for various plant canopies and bare soils. *Agric. For. Meteorol.*, **77**, 167-190.
- Matsushima, D. and Kondo, J., 1997: A proper method for estimating sensible heat flux above a horizontal-homogeneous vegetation canopy using radiometric surface observations. *J. Appl. Meteorol.*, **36**, 1696-1711.
- Ross, J., 1975: Radiative transfer in plant communities. In *Vegetation and the Atmosphere* (ed. by Monteith, J. L.). Academic Press, New York, pp. 13-55.
- Sugita, M. and Brutsaert, W., 1990: Regional surface fluxes from remotely sensed skin temperature and lower boundary layer measurements. *Water Resour. Res.*, **26**, 2937-2944.